УДК 622.24

ИМПУЛЬСНЫЕ ТОКИ С ЗАБОЯ СКВАЖИНЫ – ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ О СВОЙСТВАХ ГОРНЫХ ПОРОД

В.Д. Евсеев, М.В. Петухов, М.А. Самохвалов

Томский политехнический университет
E-mail: makpet77@mail.ru

Предлагается для получения информации с забоя бурящейся скважины о характере разрушения и составе горных пород применить методы, основанные на регистрации электромагнитных сигналов. Отмечено, что при разрушении горной породы с промывочной жидкостью зарегистрировать эти сигналы не удаётся из-за их экранировки и быстрой релаксации образующихся на свежеобразованных поверхностях зарядов. Предложена методика, позволившая фиксировать релаксационные токи, возникающие при бурении и резании горных пород у границы раздела «горная порода – режущий инструмент», замыкая их на внешний электрический контур «горная порода – режущий инструмент – станок – горная порода». Высказано предположение о возможности применения данного метода для контроля геологического разреза и процессов разрушения горных пород при бурении скважин.

Электрические явления при разрушении

Исследование электризации, происходящей при разрушении диэлектрических минералов и горных пород, началось не так давно. К настоящему времени установлено, что развитие трещин нормального отрыва при разрушении неорганических диэлектриков, какими являются основные породообразующие минералы, сопровождается пространственным разделением противоположных по знаку электрических зарядов; на свежеобразованной поверхности возникает электрический заряд плотностью q_0; наблюдаются следующие электрофизические явления:

а) эмиссия электронов высоких энергий или, по-другому, эмиссия быстрых электронов, механоэмиссия;

б) электромагнитная эмиссия.

Электрические явления и механическая прочность

М.С. Мециком [1] экспериментально показано, что работа расщепления кристалла слюды в различных внешних условиях определяется, в основном, электрическими силами взаимодействия разделяемых поверхностей трещины нормального отрыва.

На наличие тесной связи между прочностью диэлектрика и величиной электрического заряда q_0, возникающего на свежей диэлектрической поверхности, указывается в наших работах [2, 3]: осуществлено модифицирование модели эффекта Ребиндера с учетом явления «электризация при разрушении». Появление разноименных электрических зарядов на сторонах растущей трещины нормального отрыва приводит к возникновению дополнительного силового дальнодействующего взаимодействия противоположных сторон трещины, росту энергии образования единицы площади свежей поверхности до величины $\gamma_{эф}=\gamma_0+\gamma_n$, где γ_0 – удельная свободная поверхностная энергия разрушаемого тела, γ_n – механические потери энергии электростатической природы, величина которых зависит от q_0. Модифицированное выражение А.А. Гриффита для оценки трещинностойкости неорганического диэлектрика, имеющего в (на) себе трещину длиной L, с учетом механических потерь энергии электростатической природы принимает вид:

$$\sigma=\{4G[\Gamma+q_0^2\exp(-2t/\tau)h/\varepsilon\varepsilon_0]\}^{0,5}/(\pi L)^{0,5},$$

где G – модуль Юнга, 2Г – работа квазиравновесного разрушения, t – время действия нагрузки, τ – время релаксации электрических зарядов в полости трещины.

Из последнего выражения следует, что трещиностойкость нагружаемого диэлектрика зависит не только от длины первичного дефекта L (как отмечается в модели А.А. Гриффита), но и пропорциональна величине заряда q_0. При разрушении диэлектриков в одинаковых условиях и при одинаковой величине первичного дефекта трещиностойкость диэлектриков будет возрастать с увеличением q_0.

В силу того, что прочность диэлектрика при его механическом нагружении σ и интенсивность эмиссии J с его ювенильной поверхности зависят от одной величины – плотности электрических зарядов q_0, то должна наблюдаться симбатность изменения σ и J при одинаковой подготовке образцов к испытанию.

Такая зависимость экспериментально была зафиксирована В.А. Кузнецовым [4]: было обнаружено, что между величиной начальной интенсивности эмиссии электронов высокой энергии J_0, измеряемой в вакууме со свежей поверхности поликристалла LiF, и прочностью этого диэлектрика σ при одноосном сжатии существует связь: J_0 и σ изменяются симбатно при изменении температуры предварительной термовакуумной обработки образцов.

Симбатность изменения величин J_0 и σ означает, что по интенсивности эмиссии электронов высокой энергии со свежеобразованной поверхности можно судить о трещиностойкости диэлектрических образцов.

Внешние проявления электрических процессов

Выше отмечалось, что эмиссией электронов высоких энергий не ограничиваются комплекс электрокогезионных явлений: появление свежих поверхностей при механическом нагружении неорганических диэлектриков сопровождается и электромагнитной эмиссией (ЭМЭ).

Еще при разработке электронной теории адгезии появление электромагнитных сигналов связывалось с развитием электрогазоразрядного процесса в полости развивающейся трещины нормального отрыва. В настоящее время возникновение электромагнитных сигналов связывается не только с развитием электрических разрядов, но и с изменением дипольного момента заряженной трещины, колебательным движением зарядов при развитии разрушения и с релаксацией этих зарядов. При любом механизме появления электромагнитной эмиссии виновником этого процесса является электрический заряд плотностью q_0, возникающий на свежей поверхности разрушаемых диэлектрических породообразующих минералов, на свежеобразованной адгезионной поверхности.

Электромагнитная эмиссия, так же как и эмиссия электронов высокой энергии, несет информацию о величине механических потерь энергии электростатической природы, сопровождающих разрушение породообразующих диэлектрических минералов и контактов между зёрнами различных минералов, слагающих горные породы. Носителями информации о трещиностойкости твердого тела являются электромагнитные сигналы, принимаемые приемным устройством.

Связь ЭМЭ с механической прочностью тел

На связь между прочностью нагружаемых тел и количеством зафиксированных импульсов электромагнитной эмиссии впервые было обращено внимание в работе томских исследователей [5]. В этой работе образцы минералов и горных пород подвергались одноосному сжатию. Отмечается, что зарегистрированное суммарное количество импульсов электромагнитного излучения при одноосном сжатии образцов минералов убывает в ряду кварц – плагиоклаз – ортоклаз и соответствует уменьшению энергии кристаллической решетки этих минералов.

О связи между механическими свойствами горных пород и их способностью генерировать электромагнитные сигналы при механическом нагружении свидетельствуют результаты, полученные П.В. Егоровым [6]. В этом исследовании образцы горных пород подвергались одноосному сжатию с одновременной регистрацией возникающей электромагнитной эмиссии. Показано, что между суммарным числом электромагнитных импульсов и коэффициентом крепости используемых образцов горных пород имеется квадратичная корреляционная зависимость. Отмечается, что способность к генерированию электромагнитных сигналов зависит от упругопластических свойств образцов горных пород и от величины испытываемых ими механических напряжений. Большее число импульсов излучают более прочные горные породы.

На наличие связи между прочностными свойствами разрушаемых тел и параметрами ЭМЭ было обращено внимание и в работе А.А. Воробьева и др. [7]. При царапании алмазной пирамидкой образцов неорганического стекла, фтористого лития, хлористого натрия, кварца, полевого шпата, флюорита было обнаружено возрастание суммарного числа импульсов и их амплитуд с увеличением твердости испытываемых тел и возрастанием нагрузки на пирамидку.

Проведенное в [8] исследование, в котором производили одноосное сжатие кубических образцов горных пород (уголь, аргиллит, песчаник, гранит, мрамор, известняк) на гидравлическом прессе с регистрацией параметров акустической и электромагнитной эмиссий, показало, что:

а) горные породы, имеющие различную прочность, обладают различной способностью к электромагнитной эмиссии;

б) импульсы ЭМЭ появляются до начала разрушения образцов и достигают максимальных значений на запредельном участке деформационной кривой;

в) чем прочнее образец горной породы, тем раньше появляются импульсы электромагнитной эмиссии.

Существующая проблема

Уже в ранних исследованиях было замечено сильное влияние на интенсивность ЭМЭ горных пород влажности испытуемых образцов, что связывали как со снижением механической прочности при увлажнении, так и с быстрой релаксацией зарядов двойного электрического слоя токами про-

водимости, а также экранировкой электромагнитных полей высокопроводящими растворами. Насыщение образцов водой и особенно солевыми растворами образцов горных пород, имеющих невысокую способность к генерированию ЭМЭ, приводило к значительному уменьшению амплитуды импульсов, изменению их частотных характеристик и даже полному исчезновению регистрируемого сигнала. Электрические токи, возникающие при разрушении, как бы остаются в “изоляции”, находясь внутри влажного электропроводящего образца горной породы, а его экранирующее действие не даёт возможности зафиксировать электромагнитные сигналы. Поэтому первая попытка регистрации ЭМЭ при бурении образца горной породы с промывкой оказалась неудачной [9]. ЭМЭ удалось зарегистрировать только при сухом кратковременном бурении алмазной буровой головкой.

Задача исследования

Регистрация ЭМЭ при бурении
и резании горных пород с промывкой

Проблема регистрации внутренних токов, возникающих при разрушении горных пород бурением и резанием с промывкой, была решена нами с использованием внешнего замкнутого электрического контура «образец горной породы – режущий инструмент – станок – образец горной породы». Импульсный электрический ток, который возникает у границы раздела «горная порода – режущий инструмент» при бурении и резании образца горной породы, замыкается на этот контур.

Решение проблемы

Методика была реализована на буровом станке СКБ-5 с алмазной буровой головкой по схеме, рис. 1.

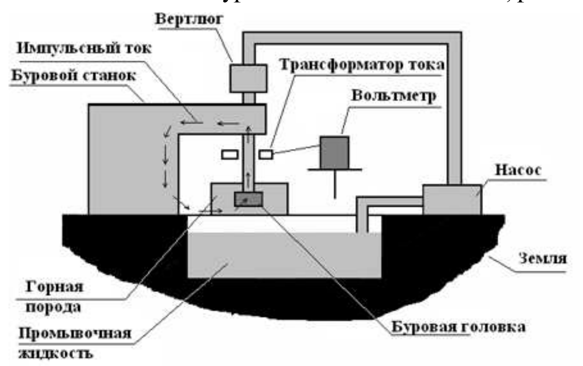


Рис. 1. *Схема установки для регистрации импульсных токов при бурении с промывкой*

Разбуривался образец гранита, который, в соответствии с предыдущими исследованиями, обладает высокой способностью к генерированию ЭМЭ. Регистрацию токов проводили в диапазоне частот от 150 кГц до 1,5 МГц. Было показано, что с ростом осевой нагрузки на буровую головку эффективное значение импульсного тока сначала возрастает, а затем практически стабилизируется, что соответствует изменению эффективности разрушения горной породы. В дальнейшем мы перешли на проведение исследования импульсных токов и при резании образцов горных пород.

Регистрацию импульсных токов при резании образцов горных пород проводили на установке, схема которой представлена на рис. 2.

Установка состоит из нагружающего блока и компьютеризированной измерительной системы. Нагружающий блок прибора включает основание – 1, электродвигатель – 2, направляющую – 3, подвижную каретку – 4 с захватом для закрепления образца горной породы – 18, шпиндель – 5, служащий для передачи вращения алмазному кругу – 6, передаточные механизмы шпинделя – 7 и подвижной каретки – 8. Охлаждение алмазного круга и удаление шлама осуществляется промывочной жидкостью в процессе резания образца (в данном исследовании использовалась техническая вода).

Измерительная система прибора состоит из персонального компьютера – 9, усилителя – 10 и датчиков (микрофона – 11 и преобразователя активной мощности – 12). Акустический сигнал принимается микрофоном – 11, усиливается и подается на вход платы акустического цифрового преобразователя, установленного в компьютере. Реализуемая активная мощность в процессе разрушения горной породы измеряется преобразователем активной мощности трехфазного тока Е848/6-М1 – 12.

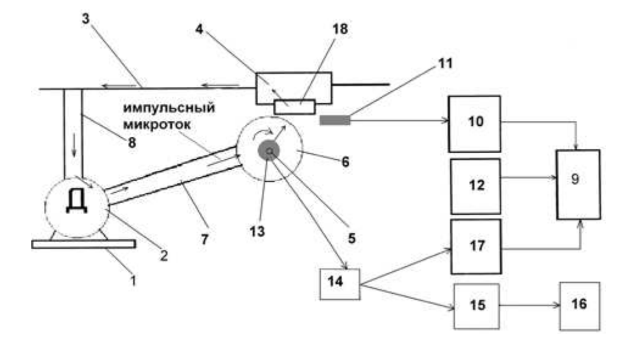


Рис. 2. *Схема установки для регистрации акустических сигналов и импульсного тока при резании образцов горной породы: 1) основание; 2) приводной двигатель; 3) направляющая; 4) подвижная каретка; 5) шпиндель; 6) алмазный круг; 7) передаточный механизм шпинделя; 8) передаточный механизм подвижной каретки; 9) компьютер; 10) усилитель; 11) микрофон; 12) измерительный преобразователь активной мощности; 13) индукционный датчик; 14) усилитель; 15) милливольтметр; 16) самопишущий потенциометр; 17) осциллограф; 18) образец горной породы*

Для регистрации импульсного тока на шпинделе – 5, изготовленного из немагнитного металла, установлен индукционный датчик – 13 (трансформатор тока на ферритовом кольце). Напряжение на выходе индукционного датчика, наведенное импульсными токами, подается на усилитель – 14, который имеет режекторный фильтр, отсекающий помехи промышленной частоты.

С выхода усилителя сигнал:

1. подается на широкополосный милливольтметр переменного тока – 15 (диапазон частот 20 Гц...5 МГц). Милливольтметр усиливает и интегрирует сигнал и выдает на выходе медленно меняющееся постоянное напряжение, пропорциональное эффективному значению поступающего на его вход сигнала. Это напряжение записывается с помощью самопишущего потенциометра – 16, скорость развертки 5400 мм/ч;
2. фиксируется осциллографом «Tektronix» – 17 и далее подается на компьютер – 9, где производится спектрально-частотная обработка сигнала.

Были исследованы 9 различных горных пород. Для оценки ЭМЭ каждой горной породы готовили не менее 3 образцов. Часть образцов высотой 35 мм изготовили из кернов диаметром 30 мм, другие образцы готовили в виде параллелепипедов размером от 35×30×20 мм^3 до 35×40×35 мм^3. При регистрации импульсного тока образцы резали алмазным кругом диаметром 100 мм на глубину 5 мм; скорость подачи составляла 2,1 мм/с, частота вращения 22,7 с$^{-1}$.

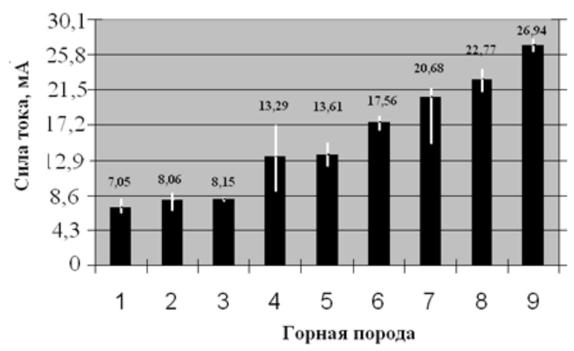


Рис. 3. *Гистограмма эффективной силы импульсного тока при резании различных горных пород: 1) переслаивание алевролита и гидрослюды; 2) крупнозернистый алевролит; 3) глина; 4) среднезернистый песчаник с высоким содержанием крупнозернистого материала, глинисто-гидрослюдистый цемент; 5) крупно-среднезернистый песчаник с кальцитовым цементом; 6) крупно-среднезернистый песчаник с кальцитовым и кварцевым цементом; 7) гранит; 8) мелкозернистый песчаник с кальцитовым цементом; 9) гранит с кальцитом в трещинах*

На рис. 3 приведены результаты обработки записей импульсных токов, возникающих при резании горных пород.

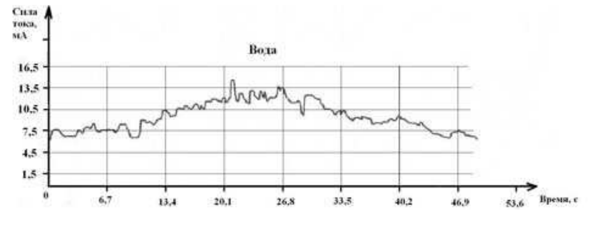
Исходя из проведенного микроскопического описания исследуемых образцов горных пород, можно отметить, что возникающий во внешнем контуре импульсный электрический ток зависит от состава горных пород.

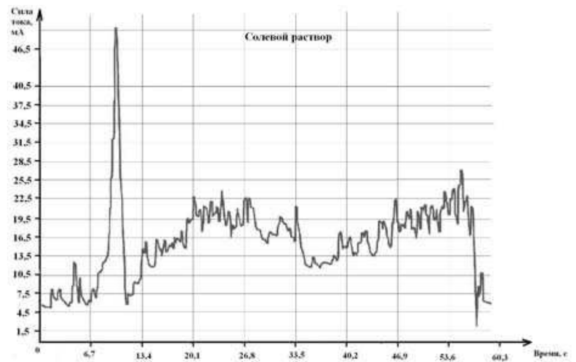
Таким образом:

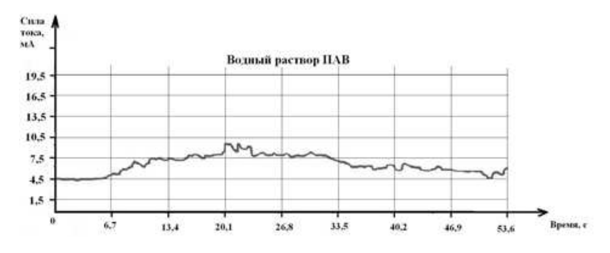
1. Зарегистрированы электрические импульсные токи при бурении и резании горных пород в присутствии промывочной жидкости.
2. Величина импульсного тока зависит от типа исследуемой горной породы.

Влияние промывочной жидкости

Так как бурение скважин происходит с применением различной промывочной жидкости, были проведены исследования по влиянию промывочной жидкости на электрические импульсные токи.







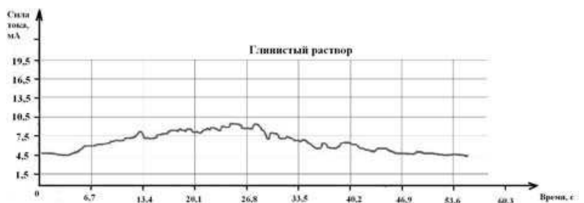


Рис. 4. *Сила тока при резании алевролита в различных промывочных жидкостях*

Испытывали 4 различных промывочных жидкости. Образцы горных пород выполнены в виде кернов диаметром 30 мм и длиной 35 мм или параллелепипедов размером от 35×30×20 мм^3 до 35×40×35 мм^3. Для оценки силы тока резания каждой горной породы готовили не менее 3 образцов.

Горные породы:

1. Гранит с кальцитом.
2. Гранит.
3. Мелкозернистый песчаник с кальцитовым цементом.
4. Среднезернистый песчаник с кальцитовым цементом.
5. Крупнозернистый алевролит.

Промывочные жидкости:

1. Техническая вода.
2. Солевой раствор (вода+20 % NaCl).
3. Водный раствор поверхностно-активных веществ (ПАВ), вода+0,5 % ПАВ.
4. Глинистый раствор (вода+15 % качественная глина).

Выводы

1. Сила импульсного тока, образующегося при резании горных пород в различных промывочных жидкостях, уменьшается в следующем порядке: солевой раствор – вода – глинистый раствор – водный раствор ПАВ.
2. Уменьшение силы импульсного тока в ряду вода – глинистый раствор – водный раствор ПАВ связано со снижением прочности горных пород при резании.
3. Максимальное значение силы импульсного тока при резании в солевом растворе, вероятно, можно объяснить образованием электрохимического источника тока «горная порода – солевой раствор – режущий инструмент».
4. Предложенный метод регистрации ЭМЭ путём измерения импульсного тока через режущий инструмент может найти применение для контроля геологического разреза и контроля процессов разрушения горных пород при бурении скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мецик М.С. Физика расщепления слюд. – Иркутск: Вост-Сиб. кн. изд., 1967. – 280 с.
2. Евсеев В.Д. Электрические потери энергии при разрушении диэлектриков // Физика диэлектриков: Тез. докл. Всесоюз. конф. – г. Караганда, 8–10 июня 1978 г. – С. 87–88.
3. Евсеев В.Д. Природа эффекта Ребиндера при разрушении неорганических диэлектриков и электрокогезионные явления // Известия вузов. Сер. Физика. – 1985. – № 2. – С. 29–35.
4. Кузнецов В.А. Исследования в области механической прививки полимеров на поверхности твердых минеральных тел при их разрушении: Дис. ... канд. хим. наук. – М., 1977. – 112 с.
5. Гольд Р.М., Марков Г.П., Могила П.Г., Самохвалов М.А. Импульсное электромагнитное излучение минералов и горных пород, подвергнутых механическому нагружению // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1975. – № 7. – С. 109–111.
6. Егоров П.В., Корнейчиков В.П., Корнейчикова Н.М., Поляков А.Н. К прогнозу ударопасности горных пород методом счета импульсного электромагнитного излучения // Измерение напряжений в массиве горных пород. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1976. – Ч. 2. – С. 112–114.
7. Воробьев А.А., Чаусов В.М., Гордеев В.Ф. Импульсное радиоизлучение при царапании некоторых диэлектрических материалов // Известия вузов. Сер. Физика. – 1977. – № 10. – С. 126–128.
8. Потураев В.Н., Булат А.Ф., Хохолев В.К. Об особенностях комплексной регистрации электромагнитного и акустического излучения при разрушении горных пород // Доклады АН СССР. – 1989. – Т. 308. – № 6. – С. 1351–1354.
9. Кривошеев В.В., Нейштетер И.А., Ларин А.А., Гордеев В.Ф. Изучение электромагнитной эмиссии при бурении анизотропных пород // В сб. трудов IV Междунар. симп. по бурению скважин в осложненных условиях. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 1998. – С. 48.